

〔研究論文〕

屋根一体型太陽電池の通電加熱による除雪 II

齋藤 輝文¹⁾, 阿部 孔明²⁾, 酢谷 彪²⁾, 柴崎浩一郎³⁾, 武澤 港斗⁴⁾,
初谷 博⁵⁾, 瀧脇 徳秋⁶⁾, 味原 真穂⁷⁾, 宍戸 保範⁸⁾, 杉山 丞⁹⁾

Snow Removal from Photovoltaic Panels with Joule Heating II

Terubumi. SAITO¹⁾, Koumei. ABE²⁾, Takeshi. SUTANI²⁾, Koichiro. SHIBAZAKI³⁾,
Minato. TAKESAWA⁴⁾, Hiroshi. HATSUYA⁵⁾, Noriaki. FUCHIWAKI⁶⁾, Masao. AJIHARA⁷⁾,
Yasunori. SHISHIDO⁸⁾, Susumu. SUGIYAMA⁹⁾

Abstract

We have conducted demonstration experiments for snow removal from photovoltaic panels with Joule heating by applying electrical power in forward direction to the photovoltaic cell pn-junctions. Tests at various heating power conditions show that minimum electric energy required for snow removal for the array of nominal generating power of 325 W is 1.56 kWh when applied electric power is 312 W and also 555 W. The energy corresponds to electric energy produced during 2.8 days in winter at the test site, Omagari, Akita. No degradation in power generation has been observed. Low cost snow detection system using a sensor with interdigitated finger structure has been fabricated based on Arduino UNO system. The system has been shown to successfully distinguish snow from rain due to the difference in resistance. It has been concluded that the technique is easy to apply and energy-effective.

1 背景と目的

2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、エネルギー構造の見直しが急務となっている。それまで電力供給の約1/3を占めていた原子力発電がベース電力を供給していた

-
- 1) 東北工業大学 工学部 環境エネルギー学科 教授, Professor, Department of Environment and Energy, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology.
 - 2) 浅海電気㈱ (環境エネルギー学科平成27年度卒業生), Asami Co., Ltd. (ex-student graduated in fiscal year 2015 from Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology)
 - 3) 積水ハウス㈱ (環境エネルギー学科平成27年度卒業生), Sekisui House, Ltd. (ex-student graduated in fiscal year 2014 from Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology)
 - 4) ラピスセミコンダクタ宮城㈱ (環境情報工学専攻修士課程平成27年度卒業生), LAPIS Semiconductor Miyagi Co., Ltd. (ex-postgraduate student graduated in fiscal year 2015 from Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology)
 - 5) ㈱吉岡 顧問, Adviser, Yoshioka Co., Ltd.
 - 6) ㈱吉岡 専務取締役, Senior Managing Director, Yoshioka Co., Ltd.
 - 7) 元㈱吉岡 技術グループ係長, Ex-Technical Group Subsection Chief, Yoshioka Co., Ltd.
 - 8) ㈱吉岡 技術グループ, Technical Group, Yoshioka Co., Ltd.
 - 9) ㈱タニタハウジングウェア秋田工場技術部部長, Technical Manager, Akita Factory, Tanita Housingware Co., Ltd.

が、安全基準の見直しや定期点検により全原発が一定期間停止する事態となった。その後原発は徐々に再稼働を開始しているが、代替エネルギー源として、再生可能エネルギーへの期待が一段と高まる状況にあり、2012年7月から再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行された¹。中でも太陽光発電は急速に普及が進み、制度開始後実際に稼働している太陽光発電の設備容量（住宅および非住宅の合計）は2016年4月末時点で約2,800万kWに達し、再生可能エネルギー全体の96%と突出して高い割合を占めている²。

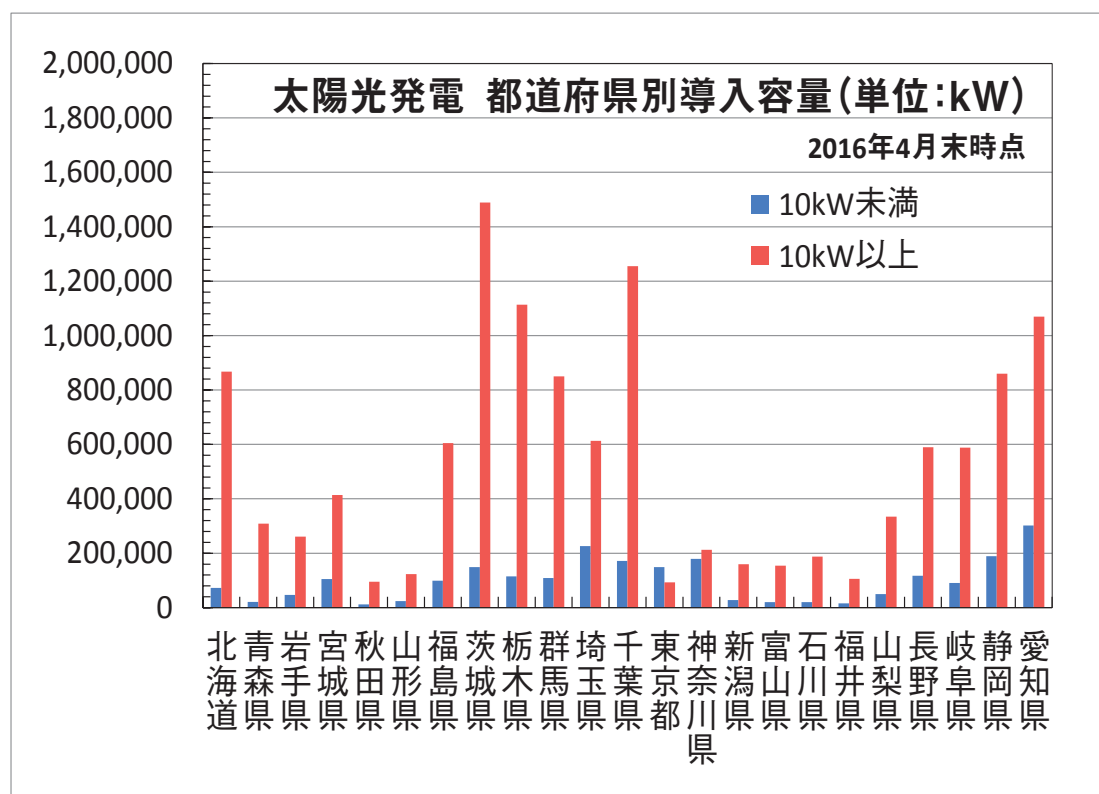


図1 太陽光発電都道府県別導入容量（2016年4月末時点データから東日本を中心に抜粋）。

しかし太陽光発電の普及率に関しては、図1³に示すように地域差が大きく、降雪が多い日本海側地域にはあまり普及が進んでいない。その最も大きな要因は、太陽光パネルへの積雪により太陽光が大方反射され、発電量が大幅に少なくなるためである。山形大学の東山^{4,5}らは電気発熱体を裏面に取り付けた融雪瓦を用いることにより落雪処理を行うことができることを報告している。

本研究では、太陽光発電パネルにヒーターを取り付けることなく、ただ外部から太陽電池のpn接合へ順方向に電流を流しジュール加熱させることによって、パネル上に降り積もった雪を滑り落とす方式の技術開発を実施することとした。同様の方式の融雪・除雪については、既に報告例^{6,7,8}があるが、除雪に要する電力量と発電量の比較や最適条件の探索、通電加熱による発電性能への影響の評価などについての記述が十分とはいえない。本研究では、これらの評価を目的とし、初年度の成果として以下の点を明らかにした⁹。

- ・通電過熱によりパネルの発電能力の劣化は認められない。

- ・太陽光発電パネルに直接通電加熱することにより，容易に雪を滑り落とせる。
- ・滑り落とすのに要した電力量は，6 A 通電時が最小の 1.56 kWh であった。これは当地同時期の平均斜面日射量から求まる発電量の 2.8 日分に相当する。
- ・除雪しない場合，積雪状態が 1 週間以上継続する可能性は高く，その間発電電力はほとんど得られないため，通電加熱による除雪に必要なエネルギーより除雪後得られる発電エネルギーが上回り，通電加熱による除雪はメリットがあると結論づけられる。

本報では，実用化に向け豪雪地である秋田県大仙市において引き続き実証実験雪を実施し，滑り落とすために必要となる電力や通電開始・停止タイミング等の条件，障害となる条件等を，さらに実験的に探索すること，また自動化のために必要となる積雪検出等の要素技術・システム化技術を開発することを目的とした。

2 実証実験

2.1 概要

通電加熱による除雪の効果を確かめるための実証実験を，豪雪地として知られる秋田県大仙市において実施した。実証実験には，(株)吉岡製屋根一体型多結晶 Si 太陽光発電モジュール「エコテクノーフ」出力 130 W のフルモジュール (ETRO1SN) 2 基及び出力 65 W のハーフモジュール (ETRO1HN) 1 基からなるアレイ（合計出力 325 W）を 2 組用いた。設置条件は，方位角 182°（ほぼ南向き），傾斜角 13°である。このモジュール 2 組を比較のため並列に設置し，通常はどちらにも発電電力利用を模擬するため，最適負荷抵抗を接続し，発電電力を消費させることによって，太陽光発電パネルの温度が通常使用時と同じ条件となるように配慮した。Web カメラにて積雪を確認したら，加熱用パネルのみ負荷を切り離し，代わりに直流電源から定電流で通電する。落雪効果を確認した後は，逆の操作で通電を停止し，太陽光発電パネルに抵抗負荷を元通りに接続する。参照用パネルには常に抵抗負荷を接続してある。通電加熱は定電流とし，以下の各条件で実施した。

5 A，57 V，285 W（公称最大出力電力の 0.9 倍）

6 A，52 V，312 W（公称最大出力電力とほぼ同じ）

9 A，61 V，555 W（公称最大出力電力の 1.7 倍）

12 A，61 V，766 W（公称最大出力電力の 2.4 倍）

通電時の電圧は，通電直後に比べ通電終了時の方が一般に低い値を示した。すなわち，太陽電池モジュールの順方向抵抗は，通電直後に比べ通電終了時の方が低い。これは，通電によって太陽電池の温度が上昇したことを反映している。定電流通電中の抵抗値の変化は最大でも 5% 弱である。ただし，電流の大きさの関数で抵抗値は大きく変化し，5 A，6 A，9 A，12 A の定電流通電時の順方向のおおよその抵抗値は，それぞれ，11 Ω，8.7 Ω，6.8 Ω，5.1 Ωである。

2.2 実証実験の結果と考察

通電電流が 5 A，6 A，9 A，12 A の各条件下での滑雪状況の変化を示す写真を図 2 に示す。通電するのは，向かって左側の加熱用パネルのみで，右側のパネルは比較参照用のため通電しておらず，常に負荷が接続されてある。表 1 には，通電から滑雪開始・滑雪完了までの所要時間，滑雪完了までの所要電力量等をまとめた結果を示した。

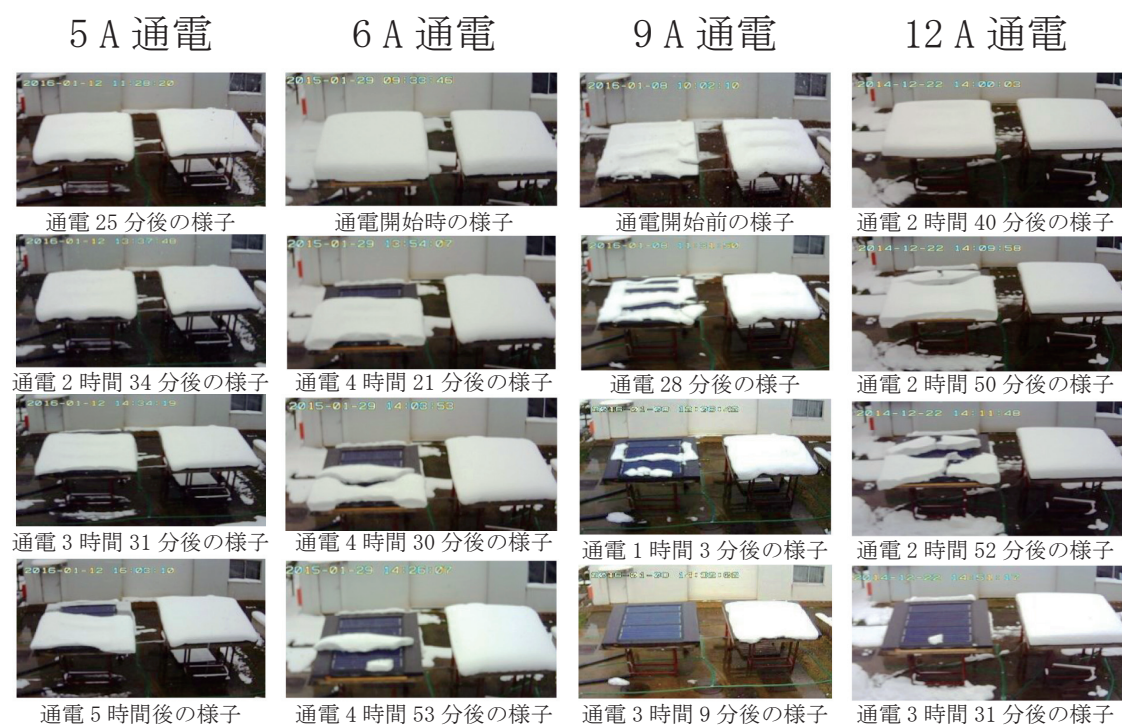


図2 通電電流が5 A、6 A、9 A、12 A通電のときのそれぞれの滑雪状況の経時変化

表1 通電から滑雪開始・滑雪完了までの所要時間、滑雪完了までの所要電力量等

Current [A]	Time till snow starts sliding [h]	Time till all snow disappear [h]	Necessary electric energy [kWh]	Necessary time to generate the energy [days]
5	> 4.17	> 6	> 1.71	> 3.1
6	4.3	5	1.56	2.8
9	0.5	2.8	1.56	2.8
12	2.5	3.4	2.61	4.7

表1中、通電電流6 Aおよび12 Aのデータは前回報告した結果⁹である。今回追加したデータも含めて比較すると、滑雪に要するエネルギーの最小値は、通電電流が6 A（通電電力312 W）および9 A（555 W）の場合で、同じ1.56 kWhであった。なお、公称最大出力電力を超える電力で通電した場合に、ほぼ全量滑雪することを確認することが出来たが、5 Aでは長時間通電加熱してもあまり滑雪せず、電力を消費するだけの結果となった。

6 A通電加熱前後の電力、温度変化を図3に示す。通電後、通電モジュールの温度が氷点近くではほぼ一定に保たれているのは、まだ積雪状態のままであるものの、接触面に雪と水が共存状態になっていて、時間とともに水の割合が増えているものと考えられる。14時頃にモジュール温度が急増したのは、当該写真を見てわかるように積雪の大部分が滑落したためである。

6 A通電時の場合、除雪に約1.56 kwhの電力量を使用したのが、これが当地、当該時期の発

電力量に比べてどの程度であるかを考える。NEDO 日射量データベース MONSOLA-11¹⁰ を用いて、設置した太陽光発電パネルへの入力である平均日射量を知ることができる。実際の設置条件に近い傾斜角 10°, 方位角 0°（真南）として、大曲における冬季（12 月～2 月）の平均斜面日射量を求めると

$$X = 1.70 \text{ kWh/m}^2$$

となる。標準太陽光の強度である放射照度 1 kW/m² が 24 時間連続する場合の面積当たりの総エネルギーは

$$Y = 24 \text{ kWh/m}^2$$

であるので、当地冬季の設備稼働率は

$$u = X/Y = 0.071$$

であることがわかる。

これより本太陽光発電モジュールの 1 日当たりの発電量期待値 Z は、 $P = 325 \text{ W}$ （トータルの公称最大出力）、 $t = 24 \text{ h}$ を用いて以下のように求まる。

$$Z = Ptu = 325 \text{ W} \times 24 \text{ h} \times 0.071 = 554 \text{ Wh}$$

したがって使用電力量 1.56 kWh は、当地冬季の当該太陽光発電パネルによる 2.8 日分の発電量に相当することになる。

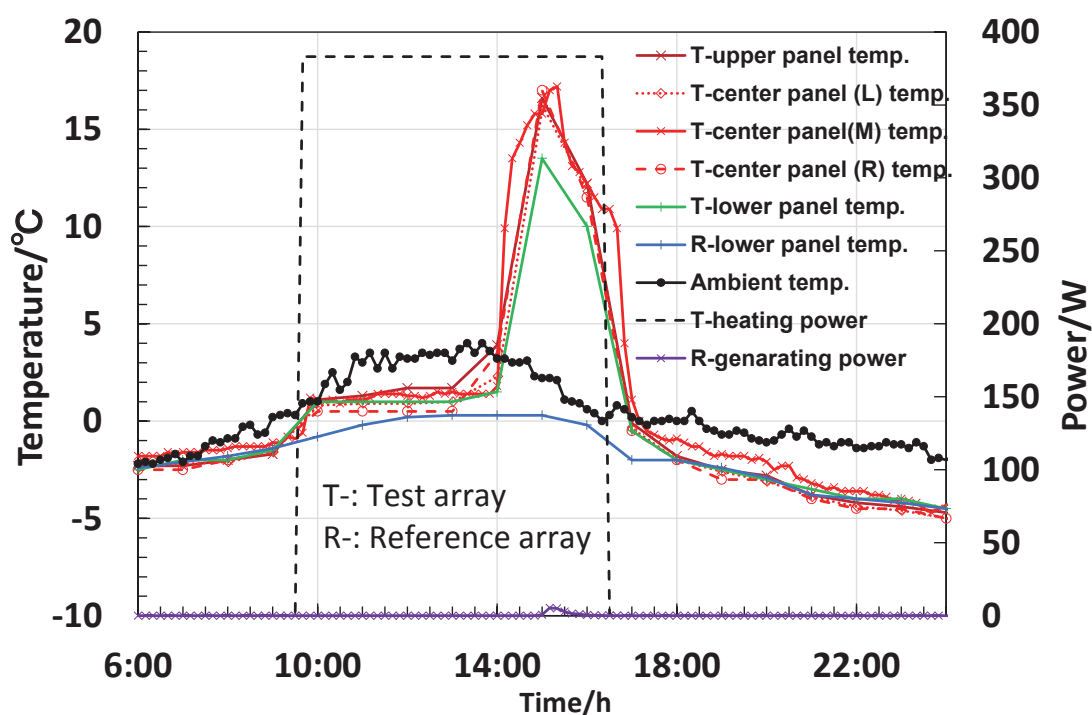


図3 6 A 通電加熱時の各部温度と電力の時間変化（2015 年 1 月 29 日）

3 積雪検知システム

本手法を実用化するにあたって、積雪を検知し、いつ通電を開始し、いつ通電を終了するかを自動的に判断・実施する積雪検知等の要素技術とシステム化技術の開発が求められる。本報では、このうちまず積雪を検知する要素技術を開発することを目的とした。

3.1 装置の設計・製作

製作には、オープンソースハードウェアであり、電子部品が安価で取り扱いが容易、技術ハードルが低い点を鑑み、Arduino UNO を用いることとした。

積雪の検出には、櫛状電極が対向してその間の電気抵抗変化を検知する方式の雨検出器を選定した。積雪検出器は市販品として存在するが、高価である上、本目的に沿った改造やインターフェース構築が別途必要となるため、小型で安価な上、入手が容易であることを考慮し、市販の雨検出器モジュールを用いて雪検出することを試みた。製作した積雪検知実験システムの写真を図4、用いた雨検出器モジュールの回路図を図5に示す。

櫛状電極が対向している雨検出器（Rain sensor）に水が接触すると、その間の電気抵抗 R_2 （図5 参照）が減少し、その両端の電圧が抵抗値に比例したアナログ電圧として出力され、これを Arduino UNO のアナログ入力端子へ接続してある。また VR1 によって閾値が可変となっており、コンパレータ X1 によって、この閾値とアナログ電圧が比較され、アナログ電圧が設定された閾値を下回るとデジタル値として、降水（積雪）が出力され、これも Arduino UNO のデジタル入力端子へ接続してある。積雪あるいは降雨があると雨検出器モジュールの抵抗値が低下するので、ある値以下になるとデジタル出力が Hi となるように回路を組み、それによってパワーリレーを駆動し、通電を開始させる構成として

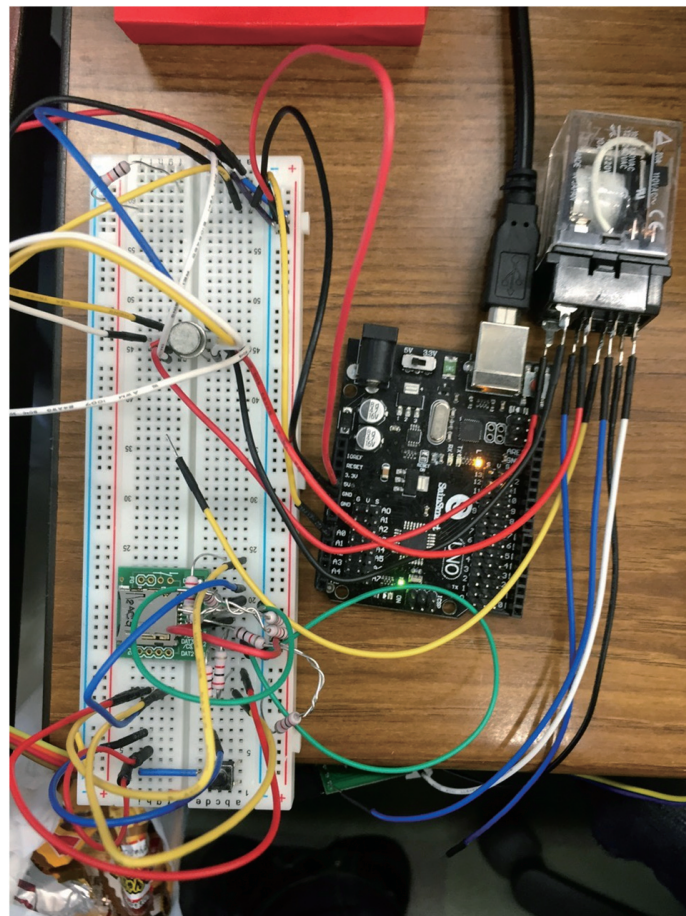


図4 Arduino UNO システムを用いた積雪検知実験システム

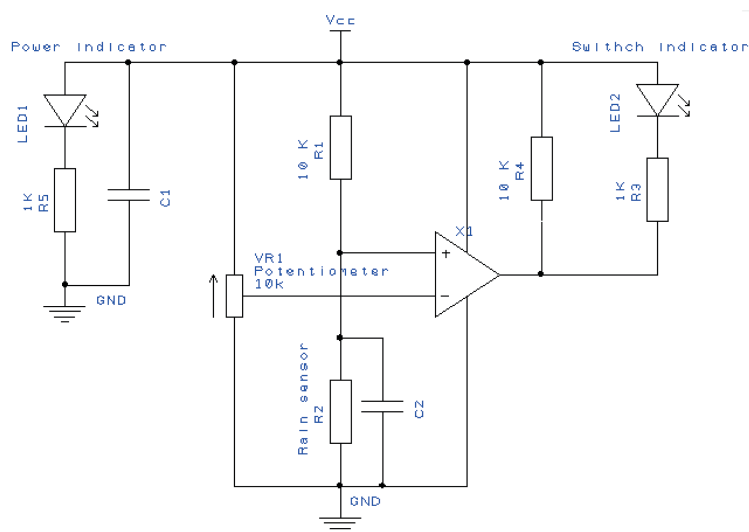


図5 積雪検知実験に使用した雨検出器モジュールの回路図。

3.2 実験方法

太陽光パネルに積雪したときのみ通電加熱を作動させるためには、積雪のみを検知することが必要となるので、雨、みぞれ、雪のそれぞれを雨検出器上に置き、そのときの出力をデータロガーとArduino UNOを用いて計測を行う。数値化されたデータと電圧のそれぞれを見比べて、雨、みぞれ、雪が識別可能かどうか検証する。

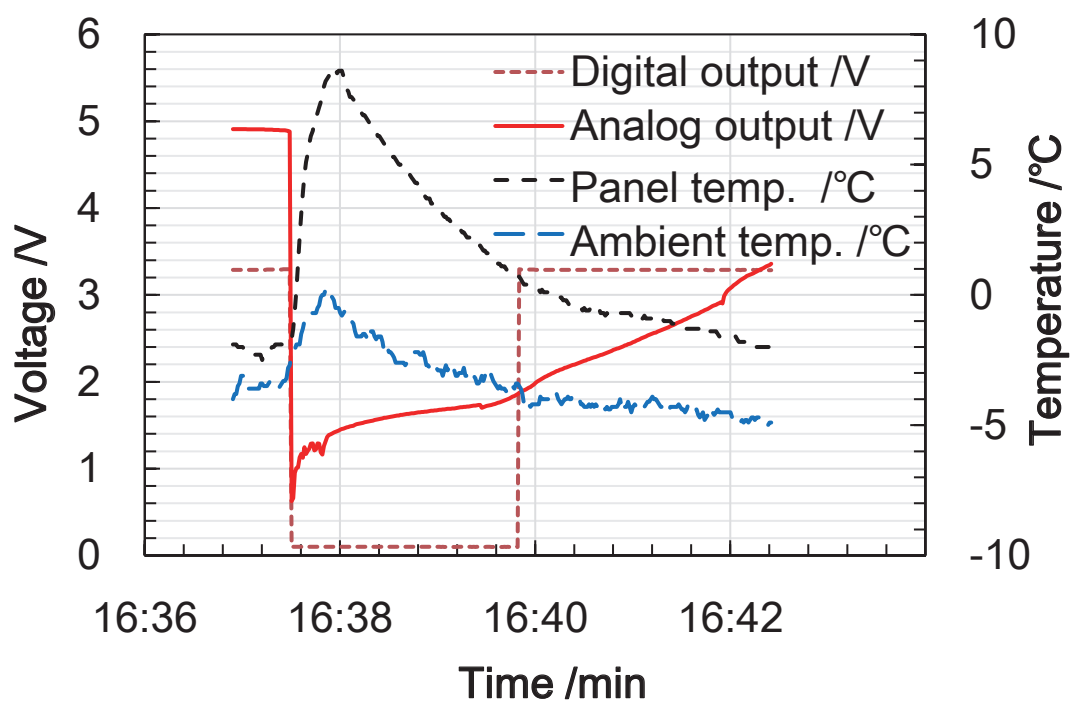


図6 冷凍庫内の雨の模擬実験

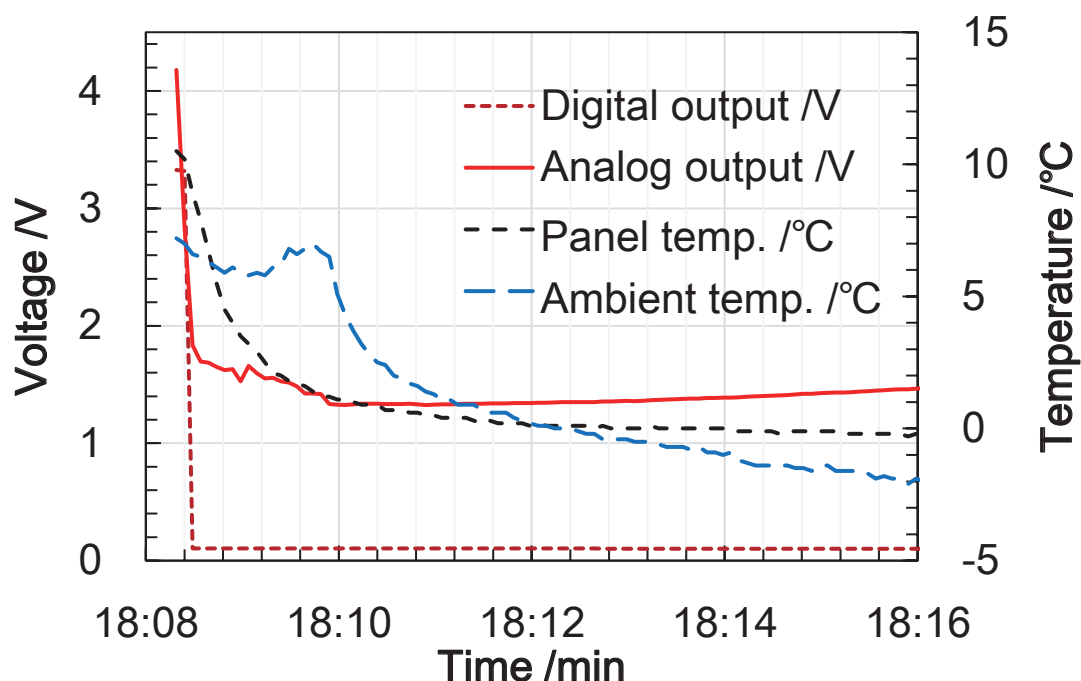


図7 冷凍庫内の雪の模擬実験

3.3 実験結果

雨，雪についての抵抗値の時間変化等をそれぞれ図6，図7に示す。図6の雨の場合，16:37に霧吹きによる水の供給を開始した後，16:40頃に止めた。

図7の雪を模擬したシャーベットでの実験では，18:08頃にシャーベットを置いた直後から計測を始めたため急速に温度が低下している。シャーベットの場合，雨とは違いパネル上により長い時間残留することになるため，雨と区別することが可能である。

雨，みぞれ，雪それぞれの場合に本実験で得られた抵抗値に比例するアナログ電圧出力範囲を表2に示す。この中で雪が最も抵抗値が高く，識別可能であることがわかった。また，パワーリレーを起動させることもできた。この雨検出器に加えて，パネル温度を測る温度センサーと組み合わせることで，より確かな識別が可能となる。

表2 雨，みぞれ，雪それぞれの場合のアナログ出力電圧範囲

Object	Analog output /V
snow	1.4-1.8
sleet	1.15-1.35
rain	0.9-1.03

4 まとめ・今後の課題

通電過熱によりパネルの発電能力の劣化は認められなかった。太陽光発電パネルに直接通電加熱することにより，容易に雪を滑り落とせることを確認した。ただし，雪の状態等

により、滑り方が異なりうることが示唆された。滑り落とすのに要した電力量は、6 A 及び 9 A 通電時が最小の 1.56 kWh であった。これは当地同時期の平均斜面日射量から求まる発電量の 2.8 日分に相当する。除雪しない場合、積雪状態が 1 週間以上継続する可能性が高く、その間発電電力はほとんど得られないため、通電加熱による除雪に必要なエネルギーより除雪後得られる発電エネルギーが上回り、通電加熱による除雪はメリットがあると結論づけられる。なお、一部の雪が太陽光パネルの枠に引っかかり残る事例が見られた。本実験では、意図的にゆるい傾斜角にしたが、実用的にはパネルの傾斜角を現状より大きくすべきと考えられる。

櫛状電極が対向してその間の電気抵抗変化を検知する方式の安価な雨検出器を用いて、雨、みぞれ、雪の中で雪が最も抵抗値が高く、雪を識別可能であることがわかった。温度センサーと組み合わせることにより、より確かな識別が可能である。単に積雪のみの検知だけではなく、積雪量の検知、さらに通電開始、終了の最適なタイミングの見極めなどの残された課題を解決することによって、自動化を実現し、実用化を目指す予定である。

今回の研究により、容易に除雪が制御できることを実証した。これは太陽光発電の目的に留まらず、豪雪地帯で問題となっている除雪作業中の落下事故の防止や、除雪の負担軽減という点で大きな利点を有するものである。

謝辞

本研究は東北工業大学地域連携センターの地域・産学連携プロジェクト研究（実用化開発研究）の助成を受け、実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1 経済産業省資源エネルギー庁 http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/index.html
- 2 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html
- 3 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト都道府県別認定・導入量（平成 28 年 4 月末時点）
http://www.fit.go.jp/statistics/contents/A_pref201604.xls
- 4 東山禎夫，浅野和俊，宮野秋彦：直線に配置した融雪瓦による落雪処理，日本雪工学会誌 7（1991.1）9-18.
- 5 東山禎夫，船場洋，浅野和俊，宮野秋彦：融雪瓦の落雪効果に及ぼす瓦表面温度の影響，日本雪工学会誌 8（1992.1）3-11.
- 6 東山禎夫，向瀬慎一，浅野和俊：通電した太陽電池アレイ上の雪滑落時における表面温度変化，日本雪工学会誌 13（1997）349-354.
- 7 東山禎夫，向瀬慎一，浅野和俊：瓦葺き屋根に設置した太陽電池アレイ上の雪処理 日本雪工学会誌 14（1998）16-25.
- 8 依田弘之，植田浩介，渡辺百樹：融雪機能付き太陽光発電システム，シャープ技報 No.86，（2003）43-47.
- 9 齋藤，柴崎，武澤，初谷，味原，宍戸，杉山：屋根一体型太陽電池の通電加熱による除雪，東北工業大学地域連携センター紀要（EOS）28（2015）11-20.
- 10 NEDO 日射量データベース MONSOLA-11 <http://app7.infoc.nedo.go.jp/metpv/monsola.html>